بررسی اثر مؤلفهٔ قائم زلزله بر دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک★

(یادداشت پژوهشی)

مجید قلهکی[۱]   محمدجواد ستاری[۲]

چکیده *خرابی ناشی از زلزله‌های نرثریدج و کوبه، حاکی از اثرات تعیین‌کنندهٔ مؤلفهٔ قائم زلزله نسبت به مؤلفهٔ افقی آنها بود. از طرفی دیوار برشی فولادی با ورق نازک یکی از سیستم‌های مقاوم نسبتاً جدید بوده است که تاکنون رفتار آن تحت مؤلفهٔ قائم زلزله بررسی نشده است. بر این اساس در این مقاله اثرات مؤلفهٔ قائم بر پاسخهای لرزه ای، همانند تغییرمکان و برش طبقات و نیروهای ستون‌ها و تیرها با استفاده از تحلیل دینامیکی تاریخچه‌زمانی غیرخطی تحت چندین نگاشت مؤلفهٔ های افقی و قائم مختلف در قابهای ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقهٔ بررسی شده است. نتایج تحلیل‌ها، نشان می‌دهد مؤلفهٔ قائم زلزله تأثیر قابل توجهی بر پاسخهای لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی دارد.*

واژه‌های کلیدی دیوار برشی فولادی با ورق نازک؛ مؤلفهٔ قائم زلزله، تحلیل دینامیکی غیرخطی؛ پاسخ‌های لرزه‌ای.

Study of Effect of Vertical Components of Earthquake on Thin Steel Plate Shear Walls

M.Gholhaki   M.J. Sattari

Abstract *Damages due to Northridge and Kobe earthquakes were expressive of considerable effects of vertical components of earthquakes compared to the horizontal ones. On the other hand, thin steel plate shear wall is one of the newest resistant systems which until now it`s behavior haven't been investigated under vertical component of earthquake. Therefore, in this article, effects of vertical component on seismic responds such as displacement and stories shear and forces of columns and beams with usage of non-linear time history dynamic analysis under several ground motions of vertical and horizontal components of earthquakes in 3, 10 and 20 frames is studied. Results of analysis show that vertical component of earthquake has considerable effect on seismic responds of steel shear walls.*

Key words Thin Steel Plate Shear Walls; Vertical Component; Non-linear Dynamic Analysis; Seismic Responds.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۱/٦/۱۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۹/۱۱ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

(۲) کارشناس ارشد سازه، دانشگاه سمنان.

مقدمه

در حالت کلی زمین‌لرزه را می‌توان براساس شش مؤلفهٔ حرکت زمین در نظر گرفت. این مؤلفهٔ ها شامل سه مؤلفهٔ انتقالی و سه مؤلفهٔ دورانی می‌باشد. حرکت زمین در هنگام زلزله معمولاً بر حسب سه مؤلفهٔ انتقالی بیان می‌شود که از سه مؤلفهٔ انتقالی زلزله دو مؤلفهٔ افقی متعامد و یک مؤلفهٔ قائم می‌باشد. مطالعهٔ حرکات زمین در طی زلزله‌های اخیر نشان می‌دهد که میزان مؤلفهٔ قائم شتاب زمین در زمین‌لرزه‌های حوزهٔ نزدیک قابل توجه و حتی در برخی از موارد از مؤلفهٔ های افقی بیشتر است[۱]. لذا تحقیقات زیادی به‌منظور بررسی اثر مؤلفهٔ قائم شتاب زلزله بر رفتار سازه‌ها صورت پذیرفته است و به‌ویژه پس از زلزله‌های نورتریدج (۱۷ ژانویهٔ ۱۹۹٤) و کوبه (۱۷ ژانویهٔ ۱۹۹۵) این مسأله مورد توجه بیشتر محققان قرار گرفته است و آئین‌نامه‌های مختلف، درصدد لحاظ کردن این موضوع مهم در توصیه‌های طراحی خود برآمده‌اند[۲].

یکی از اولین تحقیقات در این زمینه توسط اینگاس و شینوزوکا [3] صورت گرفت که در آن یک تیر طره را برای بررسی اثر مؤلفهٔ قائم زلزله مورد مطالعه قرار دادند و این اثر به‌صورت ساده‌ای مورد بررسی قرار گرفت. صادق وزیر و فوچ [4] نیز در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که ارتعاشات قائم باعث ناپایداری در ستون‌ها می‌گردد.

سالازار و هالادار[5] پاسخ لرزه‌ای سه نمونه ساختمان ۳، ۵ و ۱۵ طبقهٔ تحت ۱۳ رکورد زلزله با در نظر گرفتن مؤلفهٔ قائم در آئین‌نامه‌های نرپ و مکزیک مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که احتمال افزایش نیروی محوری در ستون‌ها وجود دارد.

دایوتالوی و لندی [6] نیز با انتخاب یک مدل دو-بعدی بتنی، اثرات مؤلفهٔ قائم زلزله بر رفتار این قاب و پارامترهای مختلفی از قبیل تغییر مکان سقف، نیروی محوری ستون‌ها و میزان جذب انرژی ستون‌ها را مورد بررسی قرار دادند. هم‌چنین در این سال علاقه‌بندیان و همکار[7] به بررسی پاسخ قاب‌های بتن آرمه تحت زلزله‌های حوزهٔ نزدیک با تأکید بر مؤلفهٔ قائم نیروی زلزله و تأثیر آن بر پاسخ غیرخطی قاب‌های دوبعدی پرداختند. هم‌چنین جو، لیو و وو[8] در این سال با تحلیل دینامیکی چند مدل سه‌بعدی بتن‌آرمه، به بررسی روند پاسخ‌های سازه‌ای و عملکرد آنها تحت مؤلفهٔ قائم زلزله پرداختند. در این تحقیق به مقایسهٔ اثرات تحریک زلزله به‌صورت دو مؤلفه‌ای و سه مؤلفه‌ای (دو مؤلفهٔ افقی و یک مؤلفهٔ قائم) پرداخته شد و اثر پارامترهای مختلفی از جمله طول دهانه (با تأکید بر روی دهانه‌های بزرگ)، تعداد طبقات و خروج از مرکزیت‌های مختلف در ساختمان‌ها مورد توجه قرار گرفت.

حسینی و فیروزی[9] اثر مؤلفهٔ قائم زلزله را در ساختمان‌های فولادی ٤ و ۵ طبقهٔ با سیستم باربر جانبی بادبند به‌وسیلهٔ نرم‌افزار دینامیکی غیرخطی Drain-3D مورد بررسی قرار دادند، نتایج عددی نشان‌دهندهٔ تأثیر قابل توجه مؤلفهٔ قائم بر ستون‌های سازه‌های مهاربندی شده بود. البته این تأثیر نسبت به ستون‌های قاب‌های خمشی (همان‌طور که انتظار می رفت) کمتر بود.

هم‌چنین مشاهدات تجربی از زلزله‌های مختلف در طی سال‌های اخیر و به‌خصوص در زلزله‌هایی نظیر کوبه و نورث ریج حاکی از وارد آمدن خسارات بسیار شدیدی به سازه‌ها است که پس از تحقیق و بررسی، علت بروز خسارات شدید را به وجود مؤلفهٔ قائم قوی در این زلزله‌ها نسبت داده‌اند (شکل ۱).

از طرفی در خلال چهار دهه گذشته، از دیوار برشی فولادی به‌عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بار جانبی که دارای عملکرد لرزه‌ای مناسبی می‌باشد، در طراحی و تقویت بعضی از ساختمان‌ها استفاده شده است[۱۰].



شکل ۱ شکست فشاری ستون‌های پل بال کریک در زلزلهٔ نورث ریج کوبه

از مزایای استفاده از این سیستم نسبت به مشابه بتنی می‌توان به مواردی هم‌چون کاهش وزن مردهٔ ساختمان و درنتیجه کاهش نیروی زلزلهٔ وارد بر آن، افزایش سختی جانبی و درنتیجه کاهش جابه‌جایی بالای آن، کاهش ابعاد تیر و ستون‌ها و درنتیجه افزایش فضای مفید طبقات و همچنین اجرای سریع و آسان آن اشاره نمود. رفتار مناسب سیستم در جذب انرژی، پایداری حلقه‌های هیسترزیس و هم‌چنین سختی، مقاومت و شکل‌پذیری بالای آن، ایدهٔ استفاده از این سیستم مقاوم در ساختمان-ها را بیش از پیش تقویت می کند[۱۰].

در این زمینه مطالعات متعدد آزمایشگاهی و تحلیلی توسط محققان مختلف در کشورهایی هم‌چون ایران، کانادا، آمریکا، ژاپن، انگلیس و تایوان انجام شده و یا در حال انجام است. در زمینهٔ دیوارهای برشی فولادی بدون سخت‌کننده می‌توان به مطالعاتی هم‌چون، ارائهٔ روابط پس از کمانش ورق توسط تربورن[11]، انجام آزمایش دیوار برشی ٤ طبقهٔ توسط تیملر و کولاک در همین سال [12]، اثر نوع اتصال تیر و ستون بر رفتار دیوار برشی فولادی توسط کیکس [13] ، بررسی رفتار دینامیکی دیوار برشی فولادی، توسط صبوری و رابرتز [14] و اثر بازشو در رفتار دیوار برشی فولادی توسط صبوری و رابرتز[15]، رفتار برشی دیوارهای برشی فولادی با ورق نرم توسط برمن و برونیو[16] اشاره کرد.

بر این اساس و با توجه به این‌که تاکنون رفتار این سیستم سازه‌ای تحت مؤلفهٔ قائم زلزله مورد بررسی قرار نگرفته است، در این تحقیق به‌منظور بررسی اثر مؤلفهٔ قائم و نیز اثر توأم مؤلفهٔ قائم و افقی، مدل آزمایشگاهی قلهکی [۱۷] که دیوار برشی فولادی شکل‌پذیر سه طبقهٔ دارای ورق نازک با مقیاس یک سوم می‌باشد، به‌منظور اطمینان یافتن از صحت مدل‌سازی و نیز نحوهٔ تحلیل نرم‌افزار و گرفتن خروجی‌های مناسب به‌همراه مدل‌های ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقهٔ در نرم‌افزار اجزاء محدود Abaqus مدل شده است و تحت چندین شتاب‌نگاشت مؤلفهٔ افقی و قائم، مورد تحلیل دینامیکی غیر خطی قرار گرفته است و اثرات دو مؤلفه‌ای و سه مؤلفه‌ای زلزله بر پاسخ‌های لرزه‌ای، از قبیل تغییرمکان و برش طبقات، نیروی محوری و لنگر خمشی ستون‌ها و نیروی برشی و لنگر خمشی تیرها، محاسبه و مقایسه گردیده است.

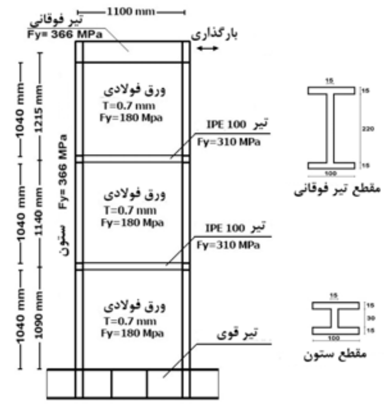
در رابطه با صحت‌سنجی نتایج مدل‌های ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقهٔ متأسفانه هنوز تحقیقی آزمایشگاهی به‌دلیل هزینه‌بر بودن و سختی کار، در موضوع اثر مؤلفهٔ قائم زلزله بر سازه ها در دنیا انجام نشده است تا بتوان به آنها استناد کرد. بنابراین به‌نظر می‌رسد باتوجه به نبود کار آزمایشگاهی مناسب در این زمینه، می‌توان برای صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده به نتایج تحلیلی و نرم‌افزاری کارهای گذشته و نیز مشاهدات تجربی زلزله‌های گذشته اکتفا کرد.

مشخصات مدل آزمایشگاهی مورد استفاده

در این تحقیق، از دیوار برشی فولادی شکل‌پذیر سه‌طبقهٔ دارای ورق نازک با مقیاس یک‌سوم که تحت بارگذاری چرخه‌ای توسط قلهکی مورد آزمایش قرار گرفته بود، استفاده شده است. دیوار مذکور دارای اتصال تیر به ستون صلب است و در ورق پانل‌ها و ستون‌ها به‌ترتیب فولاد نرم (فولاد جاذب انرژی) و پرمقاومت به‌کار گرفته شده است [۱۷].

در آزمایش فوق‌الذکر، قبل از خرابی نمونه و پایان آن، تغییرمکان طبقهٔ اول به ۱۰ برابر تغییرمکان اولین تسلیم‌شدگی آن‌رسید. نمونه، شکل‌پذیری عالی، سختی اولیهٔ زیاد و جذب انرژی بالایی داشت و حلقه‌های هیسترزیس آن رفتار پایداری را نشان دادند. استفاده از فولاد نرم (فولاد جاذب انرژی) در ورق پانل‌ها باعث جذب انرژی فوق‌العاده‌ای در تغییرمکان‌های بزرگ شد. علاوه بر این، در خلال آزمایش‌ها و تا پایان آنها هیچ‌گونه علائمی از کمانش موضعی یا کلی در ستون‌ها دیده نشد. شکل (۲) نمای کلی دیوار برشی فولادی مذکور، ابعاد و مقاطع تیرها و

ستون‌ها را نشان داده و در جدول (۱) خصوصیات مکانیکی اجزای مورد استفاده در آن آورده شده است [۱۷].



شکل ۲ نمای کلی و جزئیات نمونهٔ دیوار برشی فولادی آزمایشگاهی

جدول ۱ خصوصیات مکانیکی اجزای نمونهٔ آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی

اعضا	تنش تسلیم (N/mm^2)	تنش نهایی (N/mm^2)	مدول الاستیسیته (KN/mm^2)
ورق	۱۸۰	۳۰۰	۲۰٦
تیرهای میانی	۳۱۰	٤٤٦	۲۰٦
ستون و تیر فوقانی	۳٦٦	٥٥۰	۲۰٦

مدل‌سازی در نرم‌افزار و کالیبره کردن مدل

به‌دلیل رخ دادن کمانش‌های متعدد و وارد شدن ورق به ناحیهٔ پس کمانش، تحلیل‌های کامپیوتری دیوارهای برشی فولادی مشکلات زیادی داشته‌اند و نوع تئوری تغییرشکل‌های بزرگ به‌کار رفته و نوع آنالیز، می‌تواند تأثیر زیادی بر نتایج داشته باشد.

در ورق‌های نازک به‌علت کمانش‌های متعدد در نواحی مختلف، هم‌گرایی عددی به‌سختی صورت می‌پذیرد، لذا مش‌بندی ریز برای ورق لازم است، از این‌رو ابعاد المان‌ها پس از انجام آنالیز حساسیت به ابعاد ۵۰ میلی‌متر انتخاب شده است که این مسائله باعث کند شدن آنالیزها می‌شود. هم‌چنین از المان‌های Shell S4R در مدل‌سازی‌ها استفاده شده است.

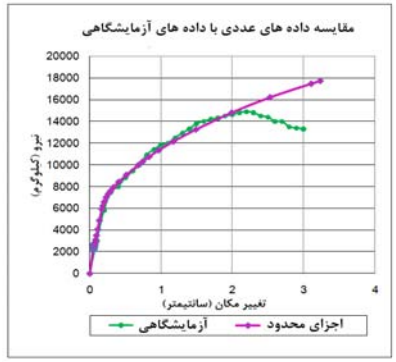
هر دو نوع غیرخطی شدن مصالح و هندسه نیز در آنالیزها لحاظ گردیده است. برای سادگی، از مدل پلاستیسیتهٔ دو خطی با سخت‌شوندگی سینماتیکی و تابع تسلیم فون میسز استفاده گردید. شیب قسمت سخت‌شوندهٔ نمودار تنش- کرنش برابر ۵ درصد قسمت الاستیک در نظر گرفته شد.

در نرم‌افزارهای اجزای محدود چنان‌چه فرض ناصافی اولیه در مرکز ورق‌ها در نظر گرفته نشود، صفحه تحت بار داخل صفحه دچار کمانش نمی‌شود و بدین ترتیب سختی و بار تسلیم دیوار بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده می‌شود. بر این اساس در این تحلیل‌ها، ابتدا آنالیز حساسیت میزان اعوجاج اولیه بر روی ورق‌ها صورت پذیرفت.

بدین‌صورت که تغییر مکان اولیه اندکی به‌میزان دل‌خواه به وسط ورق اعمال شد، سپس مدل تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون (پوش‌آور) با اعمال تغییر مکان افزاینده به نقاط انتهایی تیر عمیق طبقهٔ سوم قرار گرفت و تغییر مکان طبقهٔ اول به‌همراه برش پایه ایجاد شد، از نرم‌افزار استخراج و به‌صورت نمودار برش پایه - تغییر مکان ترسیم گردید. سپس این نمودار با پوش منحنی چرخه‌ای هیسترزیس آزمایشگاهی مقایسه شد.

تغییر مکان اولیه، مقداری کاهش داده شد و بار دیگر تحلیل پوش‌آور بر روی مدل انجام شد. این کار تا جایی ادامه پیدا کرد که اختلاف نمودار برش پایه - تغییر مکان استخراج شده از تحلیل پوش‌آور نرم‌افزار و پوش منحنی چرخه‌ای هیسترزیس آزمایشگاهی در سختی و بار تسلیم به حداقل ممکن برسد. که در نهایت میزان اعوجاج اولیه ۳ میلی‌متر با توجه به موارد ذکر شده انتخاب شد. به‌منظور کالیبره نمودن مدل، آنالیز استاتیکی غیر خطی با اعمال تغییر

مکان افزاینده به نقاط انتهایی تیر طبقهٔ سوم انجـام شـد. در شکل (۳) منحنـی بـه دسـت آمـده از آنـالیز اجـزاء محدود با پوش منحنی چرخه‌ای آزمایشگاهی مدل سـه طبقهٔ مقایسه شده است.



شکل ۳ مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی

همان‌طور کـه مشـاهده مـی‌شـود نمودارهـای بـه دست آمده از نتایج آزمایشـگاهی و عـددی در سـختی اولیه و بار تسلیم‌شدگی تطابق خوبی با یکدیگر دارند.

انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها و مقیاس کردن آنها

مطابق استاندارد ۲۸۰۰ ایران، شتاب‌نگاشت‌هایی کـه در تعیین اثر حرکت زمین مورد استفاده قرار می گیرند باید تا حد امکان نمایـانگر حرکـت واقعـی زمـین در محـل احداث بنا در هنگام وقـوع زلزلـه، باشـند. مـدت زمـان حرکت شدید زمین در شتاب‌نگاشت‌ها نیز حداقل برابر با ۱۰ ثانیه یا سه برابر زمان تناوب اصلی سازه، هر کدام بیشتر است، انتخاب می‌شوند [۱۸].

بـر ایـن اسـاس و بـا توجـه بـه اینکـه محتـوای فرکانسی شتاب‌نگاشت‌ها (v_{max}/a_{max}) بایستی نزدیک به هم باشند و نیز این نکتـه کـه در زلزلـه‌هـایی بـا PGA (شتاب حداکثر شتاب‌نگاشت) مؤلفهٔ قائم زیاد مـد نظـر قرار بگیرد، نهایتاً سه شتاب‌نگاشـت زلزلـه‌هـای طـبس (ایـران)، لومـا پریتـا (کالیفرنیـای آمریکـا) و چـی‌چـی (تایوان) انتخاب شد. بدیهی است که زلزله‌هایی با PGA و محتوای فرکانسی بالاتر نیز وجود داشتند، اما بـه‌دلیـل آن‌که از معیارهایی که در بالا ذکر شد برخوردار نبودند، از انتخاب آنها صرف نظر شد. مشخصات این زلزلـه‌هـا در جدول (۲) قابل مشاهده است.

به منظور مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌ها نیز مطابق استاندارد ۲۸۰۰ [۱۸] عمل شده است. بدین صورت که پس از مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌ها به مقـدار حـداکثر خـــود، طیـــف پاســـخ شـــتاب هـــر یـــک از زوج شتاب‌نگاشت‌های افقی مقیـاس شـده بـا منظـور کـردن نسبت میرایی ۵ درصد توسط نرم‌افزار SeismoSignal به‌دست می‌آید و پس از ترکیب کردن طیف‌هـای پاسـخ هر زوج شتاب‌نگاشت با روش جـذر مربعـات، از آنهـا متوسط‌گیری می‌شود و در محـدوده زمـان‌هـای تنـاوب 0.2T و 1.5T با طیف طرح استاندارد مقایسه می‌گردد.

در نهایت ضرایب مقیاس متفاوتی برای مدل‌های مختلف با استفاده از روش بالا به دست آمده که در شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده (افقی و قائم) ضرب شده است. در جدول (۳) ضرایب مقیاس به دست آمده برای مدل آزمایشگاهی و مدل‌های ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقهٔ آورده شده است.

طراحی مدل‌های ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقهٔ

در این تحقیق علاوه بر مدل آزمایشگاهی، مدل‌هـای ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقهٔ که به‌ترتیب نمـاد سـاختمان‌هـای کوتـاه مرتبه، میان مرتبه و بلند مرتبه می‌باشند، نیز تحت تحلیل قرار گرفتند. طراحی دیوارهای برشی فـولادی و تعیـین ضخامت آنها با اسـتفاده از روش نـواری، مطـابق آئـین نامه UBC-97 صورت گرفته و با مبحث دهم مقـررات ملی ساختمان ایران کنترل شده است.

در روش نـواری، ورق دیوارهـای برشـی فـولادی بـا مهاربندهای معادل صرفاً کششی جای‌گزین مـی‌شـود و بعد از آن‌که مقاطع تیرها، ستون‌ها و مهاربندها به‌دسـت آمـد، بـا اسـتفاده از روابـط روش نـواری، ضـخامت دیوارهای برشی فولادی به دست می‌آید [۱۰].

جدول ۲ مشخصات زلزله‌های انتخاب شده

نام زلزله	چی چی، تایوان	طبس، ایران	لوماپریتا، کالیفرنیا
حداکثر شتاب افقی (g)	۰/۹۷	۰/۸٤	۰/۵۳
حداکثر شتاب قائم (g)	۰/۷۲	۰/٦۹	۰/۵٤
نسبت سرعت ماکزیمم به شتاب ماکزیمم- افقی (ثانیه)	۰/۱۱۳	۰/۱۱۹	۰/۰٦۸
نسبت سرعت ماکزیمم به شتاب ماکزیمم – قائم (ثانیه)	۰/۰٦۹	۰/۰٦٦	۰/۰۳۳
تعداد داده های رکورد	۱۷۹۹۵	۱٦۳۷	۷۹۸٦
بازه زمانی (ثانیه)	۰/۰۰۵	۰/۰۲	۰/۰۰۵
مدت زلزله (ثانیه)	۸۹/۹۹	۳۲/۸۲	۳۹/۹۵
مدت زمان حرکت شدید زمین-افقی(ثانیه)	۲۱/۷۷	۱٦/٤۸	۱۱/۹۱۵
مدت زمان حرکت شدید زمین-قائم(ثانیه)	۱۲/۷۳	۱۳/۹۸	۱۰/۵۹

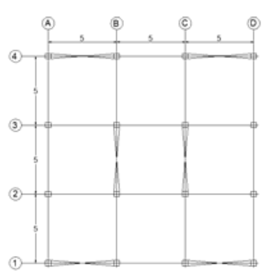
جدول ۳ ضرایب مقیاس به دست آمده برای مدل‌های آزمایشگاهی،۱۰،۳ و ۲۰ طبقهٔ

مدل	دوره تناوب(ثانیه)	ضریب مقیاس
آزمایشگاهی	۰/۱۳	۰/٤٤۸
سه طبقهٔ	۰/۲٦	۰/٤۵۳
۱۰ طبقهٔ	۰/٦٤	۰/۵٤۹
۲۰ طبقهٔ	۱/۰۸	۰/۸۳

پلان مربع شکلی با دهانه های ۵ متری و ۳ دهانه در هر برای در نظر گرفته شده است کـه در شـکل (٤) مشاهده می‌شود. ارتفاع طبقـات، ۳ متـر اسـت و بـرای بارگذاری ثقلی با اسـتفاده از آئـین نامـهٔ مبحـث ششـم مقررات ملی ساختمان، کاربری ساختمان‌ها مسکونی در نظر گرفته شده است. شدت بار مردهٔ طبقات، بار مـردهٔ بام، بار زنده طبقات و بار زندهٔ بام به‌ترتیـب ٦۰۰، ۵۰۰، ۲۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مربع مفروض است.

توزیع نیروی جانبی در ارتفاع ساختمان براسـاس استاندارد ۲۸۰۰ زلزلهٔ ایران و با فرض نوع زمین تیپ ۳، شتاب مبنای طرح ۰/۳۵، ضـریب اهمیـت ۱ و ضـریب رفتار ۷ (قاب خمشی فولادی متوسط + مهاربندی هـم محور فولادی) انجام شد. هم‌چنین نوع سقف، دال بتنی با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در طراحی-ها فولادهای مشابه با مدل آزمایشگاهی بـه کـار گرفتـه شدند.

قاب دو بعـدی یـک دهانـهٔ محـور B-2,3 بـرای طراحی دیوارها و سپس مدل‌سازی در نرم‌افزار Abaqus از مدل سه‌بعدی طراحی شده در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که مقاطع ستون‌ها از قوطی، مقـاطع تیرهـا از تیر ورق و مقاطع مهاربندهای معـادل از نـاودانی دوبـل انتخاب شده است. بر این اسـاس مقـاطع تیـر و سـتون قاب های ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقهٔ به همـراه ضـخامت نهـایی ورق‌های دیوارهای برشی فولادی هر طبقـهٔ در جـداول (٤)، (۵) و (٦) آورده شده است. در جداول، t ضخامت ورق فولادی است.



شکل ٤ پلان مربع مربوط به مدل‌های ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقهٔ دیوار برشی فولادی

جدول ٤ مقاطع تیر، ستون و ضخامت دیوار برشی فولادی ۳ طبقهٔ

طبقهٔ	ستون	تیر	t(mm)
سوم	Box ۲۵×۰/۸	Pl۳۰×۱/۵-۱۵×۱/۵	۱/۰
دوم	Box ۲۵×۱/۲	Pl۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۱/۵
اول	Box ۲۵×۱/۲	Pl۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۱/۵

جدول ۵ مقاطع تیر، ستون و ضخامت دیوار برشی فولادی ۱۰ طبقهٔ

طبقهٔ	ستون	تیر	t(mm)
دهم	Box ۲۵×۰/۸	Pl۳۰×۱/۵-۱۵×۱/۵	۱/۰
نهم	Box۲۵×۱/۲	Pl۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۱/۵
هشتم	Box۳۰×۱/۵	Pl۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۲/۰
هفتم	Box ۳۰×۱/۵	Pl۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۲/٤
ششم	Box ۳۰×۱/۵	Pl۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۲/۷
پنجم	Box ۳۵×۱/۵	Pl۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۳/۱
چهارم	Box ٤۰×۱/۵	Pl۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۳/٤
سوم	Box ۵۰×۲	Pl۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۳/۸
دوم	Box۵۰×۲	Pl۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۳/۸
اول	Box۵۰×۲	Pl۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۳/۸

انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی

تحلیل دینامیکی غیرخطی صریح (Explicit) با دادن شتاب‌نگاشت‌های زلزله بر روی مدل آزمایشگاهی و مدل‌های ۳، ۱۰ و۲۰ طبقهٔ انجام گرفت.

لازم به ذکر است که مجموع بار مرده و زنده معادل با ٤۳۰ kg/m برای اعمال بر تیرهای طبقات اول و دوم و ۳۵۸ kg/m برای اعمال بر تیر طبقهٔ سوم مدل آزمایشگاهی در نظر گرفته شد (مدل آزمایشگاهی دارای مقیاس ۱/۳ است).

در مدل‌های ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقهٔ نیز بار مرده و زندهٔ ی تیرهای طبقات به‌ترتیب برابر ۱۵۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر متر بوده و بار مرده و زندهٔ تیر طبقهٔ آخر به‌ترتیب برابر ۱۲۵۰ و ۳۷۵ کیلوگرم بر متر برآورد و اعمال گردید.

جدول ٦ مقاطع تیر، ستون و ضخامت دیوار برشی فولادی ۲۰ طبقهٔ

طبقهٔ	ستون	تیر	t(mm)
بیستم	Box ۲۵×۱	Pl ۳۰×۱/۵-۱۵×۱/۵	۰/۸
نوزدهم	Box ۳۰×۱	Pl ۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۰/۸
هجدهم	Box ۳۰×۱	Pl ۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۱/۳
هفدهم	Box ۳۰×۱	Pl ۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۱/۷
شانزدهم	Box ۳۰×۱/۵	Pl ۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۲/٤
پانزدهم	Box ۳۰×۱/۵	Pl ۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۲/٤
چهاردهم	Box ۳۵×۱/۵	Pl ۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۳/۱
سیزدهم	Box ۳۵×۱/۵	Pl ۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۳/۱
دوازدهم	Box ٤۰×۱/۵	Pl ۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۳/۱
یازدهم	Box ٤۰×۱/۵	Pl ۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۳/۱
دهم	Box ۵۰×۲	Pl ۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۳/٤
نهم	Box ۵۰×۲	Pl ۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۳/۸
هشتم	Box ٦۰×۲	Pl ۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	۵/۰
هفتم	Box ٦۵×۲	Pl ۳۰×۰/۸-۱۵×۰/۸	٤/۹
ششم	Box ۷۵×۲/۵	Pl ۳۰×۱-۱۵×۱	٤/۹
پنجم	Box ۷۵×۲/۵	Pl ۳۰×۱-۱۵×۱	۵/۰
چهارم	Box ۸۰×۳	Pl ۳۰×۱-۱۵×۱	۵/۰
سوم	Box ۹۵×٤	Pl ۳۰×۱-۱۵×۱	۵/۰
دوم	Box ۱۰۰×۵	Pl ۳۰×۱-۱۵×۱	۵/۱
اول	Box ۱۰۰×۵	Pl ۳۰×۱-۱۵×۱	۵/۱

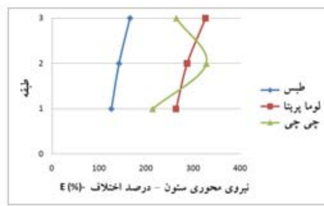
بررسی نیروها و تغییرمکان‌های اعضا و طبقات

به دنبال اعمال بارهای ثقلی مذکور و شتاب پایهٔ افقی و قائم ناشی از زلزله‌های طبس، لوما پریتا و چی‌چی نیروهای محوری و لنگر خمشی ستون‌ها و نیروی برشی، لنگر خمشی در انتها، لنگر خمشی وسط تیرها، هم‌چنین برش و تغییر مکان افقی طبقات در تمامی نمونه ها مورد بررسی قرار گرفت.

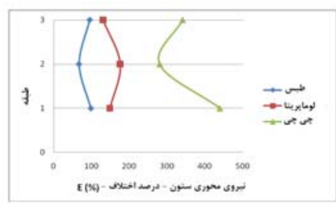
بررسی نیروی محوری ستون‌ها. نمودار تغییرات درصد اختلاف میان نیروی محوری ستون‌ها در دو حالت اثر هم‌زمان دو مؤلفهٔ افقی و قائم و نیز اثر تنها مؤلفهٔ افقی بر حسب طبقات تحت سه زلزله طبس، لوماپریتا و چی چی و در مدل‌های آزمایشگاهی، ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقهٔ به‌ترتیب در شکل‌های (۵) تا (۸) آورده شده

است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مؤلفهٔ قائم زلزله تأثیر قابل ملاحظه ای بر نیروی محوری ستون‌ها در سیستم دیوار برشی فولادی دارد. در مدل آزمایشگاهی بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ درصد (بین ۱ تا ۳ برابر)، در مدل سه طبقهٔ بین ۱۰۰ تا ٤۰۰ درصد (بین ۱ تا ٤ برابر)، در مدل ۱۰ طبقهٔ بین ۲۰۰ تا ۸۰۰ درصد (بین ۲ تا ۸ برابر) و در مدل ۲۰ طبقهٔ بین ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ درصد (بین ۱۰ تا ۱۵ برابر)، افزایش نیروی محوری ستون‌ها تحت اثر مؤلفهٔ قائم زلزله دیده می‌شود.



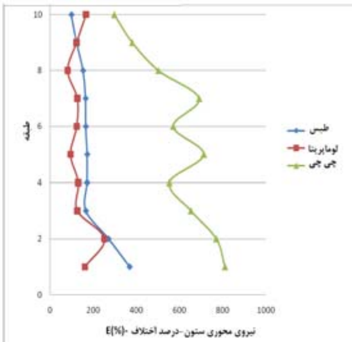
شکل ۵ تغییرات درصد نیروی محوری ستون‌ها بر حسب طبقات در مدل آزمایشگاهی



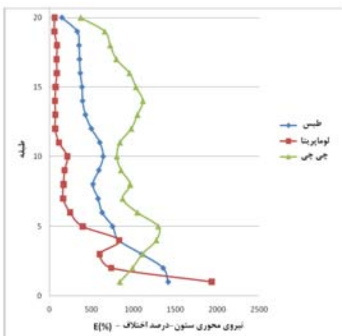
شکل ٦ تغییرات درصد نیروی محوری ستون‌ها بر حسب طبقات در مدل ۳ طبقهٔ

این مطلب نشان می‌دهد که تأثیر مؤلفهٔ قائم زلزله بر نیروی محوری ستون‌ها در ساختمان‌های میان مرتبه (۱۰ طبقهٔ) و بلند مرتبه (۲۰ طبقهٔ) و دارای سیستم دیوار برشی فولادی نسبت به ساختمان‌های کوتاه مرتبه بیشتر است. هم‌چنین در ساختمان‌های کوتاه مرتبه تأثیر مؤلفهٔ قائم زلزله بیشتر در طبقات بالایی بوده، اما در ساختمان‌های میان مرتبه و بلند مرتبه این مؤلفهٔ بیشتر در طبقات تحتانی تأثیر می‌گذارد.

بررسی لنگر خمشی ستون‌ها. نمودار تغییرات درصد اختلاف میان لنگر خمشی ستون‌ها در دو حالت اثر هم‌زمان دو مؤلفهٔ افقی و قائم و نیز اثر تنها مؤلفهٔ افقی بر حسب طبقات تحت سه زلزله و در مدل‌های آزمایشگاهی، ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقهٔ دارای سیستم دیوار برشی فولادی به‌ترتیب در شکل‌های (۹) تا (۱۲) آورده شده است.



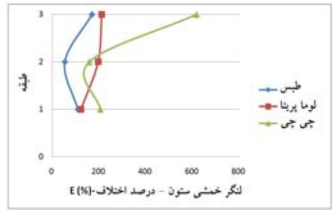
شکل ۷ تغییرات درصد نیروی محوری ستون‌ها بر حسب طبقات در مدل ۱۰ طبقهٔ



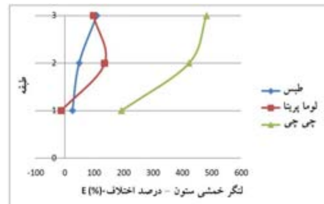
شکل ۸ تغییرات درصد نیروی محوری ستون‌ها بر حسب طبقات در مدل ۲۰ طبقهٔ

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مؤلفهٔ قائم زلزله تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر لنگر خمشی ستون‌ها دارد. در تمامی مدل‌ها تقریباً بین ۱۰۰ تا ٦۰۰ درصد (بین ۱ تا ٦ برابر) افزایش لنگر خمشی ستون‌ها تحت اثر مؤلفهٔ قائم زلزله دیده می‌شود، این نتایج نشان می‌دهند که افزایش ارتفاع سازه تأثیری در تأثیر بیشتر این مؤلفهٔ ندارد.

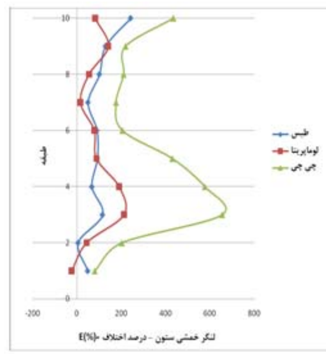
بر این اساس در ساختمان‌های کوتاه مرتبه (۳ طبقهٔ) دارای سیستم دیوار برشی فولادی تأثیر مؤلفهٔ قائم زلزله بر لنگر خمشی ستون‌ها بیشتر در طبقات بالایی بوده، اما در ساختمان‌های میان مرتبه (۱۰ طبقهٔ) و بلند مرتبه (۲۰ طبقهٔ) این مؤلفهٔ بیشتر در طبقات میانی تأثیر گذار است.



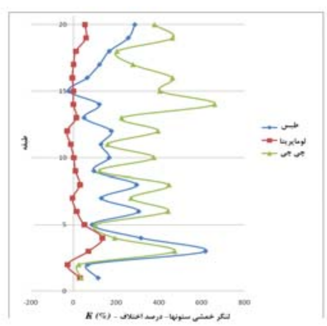
شکل ۹ تغییرات درصد لنگر خمشی ستون‌ها بر حسب طبقات در مدل آزمایشگاهی



شکل ۱۰ تغییرات درصد لنگر خمشی ستون‌ها بر حسب طبقات در مدل ۳ طبقهٔ

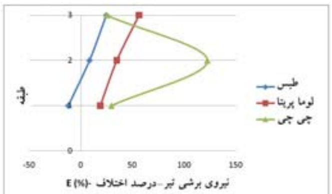


شکل ۱۱ تغییرات درصد لنگر خمشی ستون‌ها بر حسب طبقات در مدل ۱۰ طبقهٔ

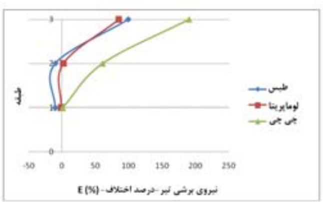


شکل ۱۲ تغییرات درصد لنگر خمشی ستون‌ها بر حسب طبقات در مدل ۲۰ طبقهٔ

بررسی نیروی برشی تیرها. نمودار تغییرات درصد اختلاف میان نیروی برشی تیرها در دو حالت اثر هم‌زمان دو مؤلفهٔ افقی و قائم و نیز اثر تنها مؤلفهٔ افقی بر حسب طبقات تحت سه زلزله و در مدل‌های آزمایشگاهی ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقهٔ دارای سیستم دیوار برشی فولادی به‌ترتیب در شکل‌های (۱۳) تا (۱۶) آورده شده است.

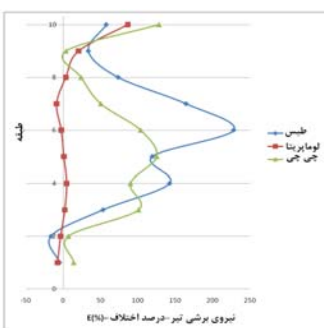


شکل ۱۳ تغییرات درصد نیروی برشی تیرها بر حسب طبقات در مدل آزمایشگاهی

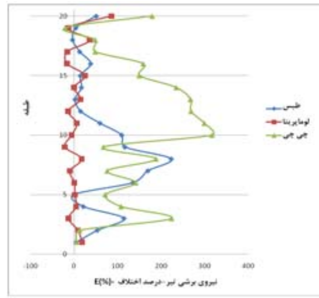


شکل ۱٤ تغییرات درصد نیروی برشی تیرها بر حسب طبقات در مدل سه طبقهٔ

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مؤلفهٔ قائم زلزله تأثیر کمتری بر نیروی برشی تیرها در سیستم دیوار برشی فولادی دارد.



شکل ۱۵ تغییرات درصد نیروی برشی تیرها بر حسب طبقات در مدل ۱۰ طبقهٔ



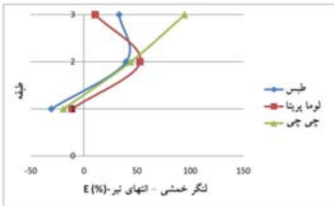
شکل ١٦ تغییرات درصد نیروی برشی تیرها بر حسب طبقات در مدل ۲۰ طبقهٔ

در مدل آزمایشگاهی بین ۲۰ تا ۱۰۰ درصد (بین ۰/۲ تا ۱ برابر)، در مدل سه طبقهٔ بین ۲۰ تا ۲۰۰ درصد (بین ۰/۲ تا ۲ برابر)، در مدل ۱۰ طبقهٔ بین ۲۰ تا ۲۵۰ درصد (بین ۰/۲ تا ۲/۵ برابر) و در مدل ۲۰ طبقهٔ بین ۲۰ تا ۳۰۰ درصد (بین ۰/۲ تا ۳ برابر)، مؤلفهٔ قائم باعث افزایش نیروی برشی می‌شود و این نتیجه نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع سازه اثر فوق العاده ناچیزی در افزایش نیروی برشی تیرها در سیستم دیوار برشی فولادی دارد.

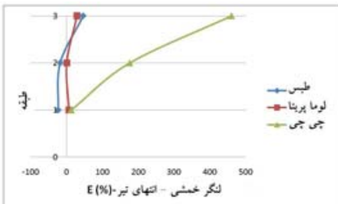
بر این اساس در ساختمان‌های کوتاه مرتبه تأثیر مؤلفهٔ قائم زلزله بر نیروی برشی تیرها بیشتر در طبقات بالایی است، اما در ساختمان‌های میان مرتبه و بلند مرتبه این مؤلفهٔ بیشتر در طبقات میانی اثرگذار است.

بررسی لنگر خمشی دو انتهای تیرها. نمودار تغییرات درصد اختلاف میان لنگر خمشی دو انتهای تیرها در دو حالت اثر هم‌زمان دو مؤلفهٔ افقی و قائم و نیز اثر تنها مؤلفهٔ افقی بر حسب طبقات تحت سه زلزله در مدل‌های آزمایشگاهی، ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقهٔ به‌ترتیب در شکل‌های (۱۷) تا (۲۰) آورده شده است.

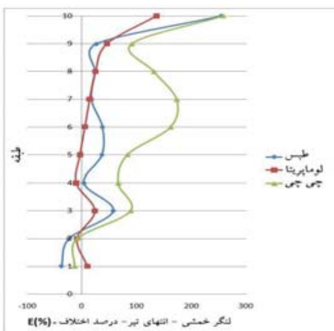
همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مدل آزمایشگاهی بین ۲۰ تا ۱۰۰ درصد (بین ۰/۲ تا ۱ برابر) و در مدل‌های دیگر بین ۲۰ تا ٤۰۰ درصد (بین ۰/۲ تا ٤ برابر) افزایش لنگر خمشی دو انتهای تیرها تحت اثر مؤلفهٔ قائم زلزله دیده می‌شود و این مطلب نشان می‌دهد که اثر افزایش ارتفاع سازه در مؤثر بودن این مؤلفهٔ به روشنی مشخص نیست.



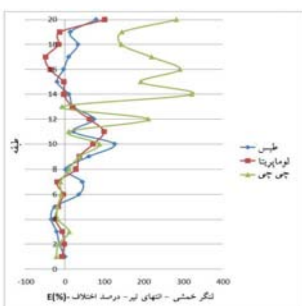
شکل ١٧ تغییرات درصد لنگر خمشی دو انتهای تیرها بر حسب طبقات در مدل آزمایشگاهی



شکل ١٨ تغییرات درصد لنگر خمشی دو انتهای تیرها بر حسب طبقات در مدل ۳ طبقهٔ



شکل ١٩ تغییرات درصد لنگر خمشی دو انتهای تیرها بر حسب طبقات در مدل ۱۰ طبقهٔ

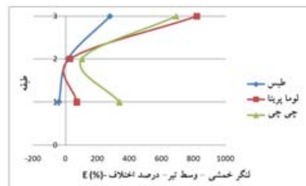


شکل ٢٠ تغییرات درصد لنگر خمشی دو انتهای تیرها بر حسب طبقات در مدل ۲۰ طبقهٔ

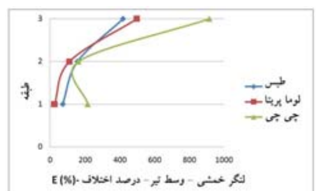
هم‌چنین در تمامی ساختمان‌های کوتاه مرتبه، میان مرتبه و بلند مرتبه دارای سیستم دیوار برشی فولادی، تاثیر مؤلفهٔ قائم زلزله بر لنگر خمشی دو

انتهای تیرها بیشتر در طبقات بالایی رخ می دهد.

بررسی لنگر خمشی وسط تیرها. نمودار تغییرات درصد اختلاف میان لنگر خمشی وسط تیرها در دو حالت اثر هم‌زمان دو مؤلفهٔ افقی و قائم و نیز اثر تنها مؤلفهٔ افقی بر حسب طبقات تحت سه زلزله در مدل‌های آزمایشگاهی ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقهٔ و در شکل‌های (۲۱) تا (۲٤) نشان داده شده است.

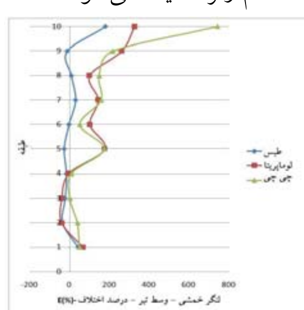


شکل ۲۱ تغییرات درصد لنگر خمشی وسط تیرها بر حسب طبقات در مدل آزمایشگاهی

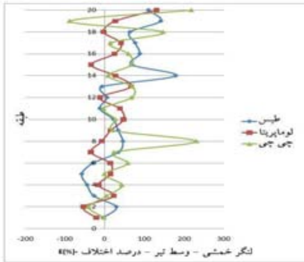


شکل ۲۲ تغییرات درصد لنگر خمشی وسط تیرها بر حسب طبقات در مدل ۳ طبقهٔ

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مدل آزمایشگاهی و سه طبقهٔ بین ۲۰ تا ۸۰۰ درصد (بین ۰/۲ تا ۸ برابر)، در مدل ۱۰ طبقهٔ بین ۲۰ تا ٦۰۰ درصد (بین ۰/۲ تا ٦ برابر) و در مدل ۲۰ طبقهٔ بین۲۰ تا ۲۰۰ درصد (بین ۰/۲ تا ۲ برابر) افزایش لنگر خمشی وسط تیرها تحت اثر مؤلفهٔ قائم زلزله دیده می‌شود.



شکل ۲۳ تغییرات درصد لنگر خمشی وسط تیرها بر حسب طبقات در مدل ۱۰ طبقهٔ



شکل ۲٤ تغییرات درصد لنگر خمشی وسط تیرها بر حسب طبقات در مدل ۲۰ طبقهٔ

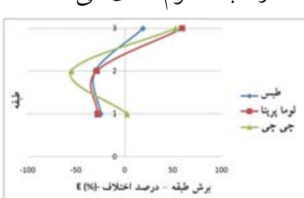
این مطلب نشان می‌دهد که تأثیر مؤلفهٔ قائم زلزله بر لنگر خمشی وسط تیرها در ساختمان‌های میان مرتبه و بلند مرتبه دارای سیستم دیوار برشی فولادی نسبت به ساختمان‌های کوتاه مرتبه کمتر است. به بیان دیگر افزایش ارتفاع سازه در مؤثر بودن مؤلفهٔ قائم زلزله اثر معکوس دارد.

هم‌چنین در تمامی ساختمان‌ها (کوتاه مرتبه، میان مرتبه و بلند مرتبه)، تأثیر مؤلفهٔ قائم زلزله بر لنگر خمشی وسط تیرها بیشتر در طبقات بالایی اتفاق می‌افتد.

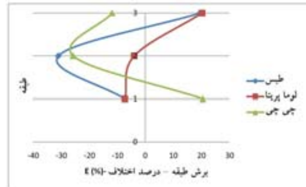
بررسی برش طبقات

نمودار تغییرات درصد اختلاف میان برش طبقات در دو حالت اثر هم‌زمان دو مؤلفهٔ افقی و قائم و نیز اثر تنها مؤلفهٔ افقی بر حسب طبقات تحت سه زلزله در مدل‌های آزمایشگاهی، ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقهٔ به‌ترتیب در شکل‌های (۲۵) تا (۲۸) نشان داده شده است.

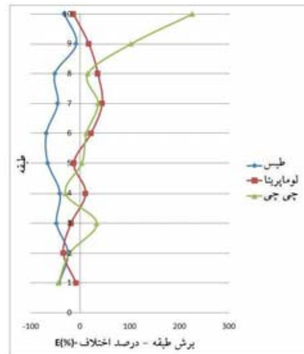
همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مدل آزمایشگاهی و سه طبقهٔ بین ۱۰ تا ۵۰ درصد (بین ۰/۱ تا ۰/۵ برابر) کاهش برش طبقات در طبقات اول و دوم و بین ۲۰ تا ۵۰ درصد (بین ۰/۲ تا ۰/۵ برابر) افزایش برش طبقات در طبقهٔ سوم اتفاق می‌افتد.



شکل ۲۵ تغییرات درصد برش هر طبقهٔ در مدل آزمایشگاهی



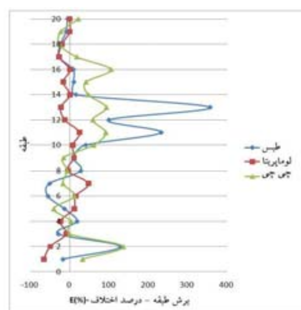
شکل ۲۶ تغییرات درصد برش هر طبقهٔ در مدل ۳ طبقهٔ



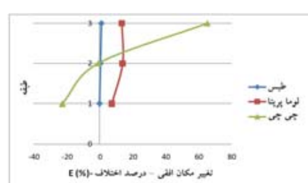
شکل ۲۷ تغییرات درصد برش هر طبقهٔ در مدل ۱۰ طبقهٔ

بررسی تغییر مکان افقی طبقات

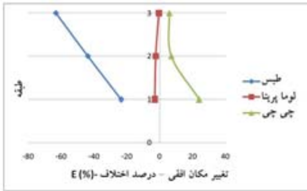
نمودار تغییرات درصد اختلاف میان تغییـر مکـان افقـی طبقات در دو حالت اثر هم‌زمان دو مؤلفهٔ افقی و قائم و نیز اثر تنها مؤلفهٔ افقی بر حسب طبقات تحت سه زلزله در مدل‌های آزمایشگاهی، ۳، ۱۰ و ۲۰ طبقهٔ به‌ترتیب در شکلهای (۲۹) تا (۳۲) آورده شده است.



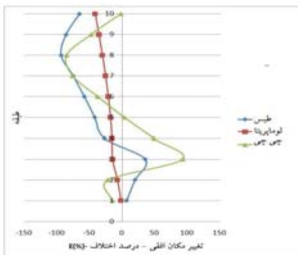
شکل ۲۸ تغییرات درصد برش هر طبقهٔ در مدل ۲۰ طبقهٔ



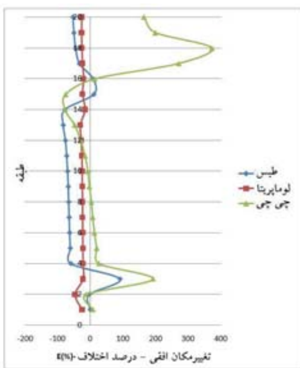
شکل ۲۹ تغییرات درصد تغییر مکان افقی هر طبقهٔ در مدل آزمایشگاهی



شکل ۳۰ تغییرات درصد تغییر مکان افقی هر طبقهٔ در مدل ۳ طبقهٔ



شکل ۳۱ تغییرات درصد تغییر مکان افقی هر طبقهٔ در مدل ۱۰ طبقهٔ



شکل ۳۲ تغییرات درصد تغییر مکان افقی هر طبقهٔ در مدل ۲۰ طبقهٔ

همان‌طور که مشاهده می‌شود، به طور کلی تغییـر مکان افقی طبقات در تمـامی مـدل‌هـا بـین ۲۵ تـا ۱۰۰ درصد تحت اثر مولفه قائم زلزله کاهش مـی یابـد. ایـن تأثیر در ساختمان‌های میان مرتبـه و بلنـد مرتبـه بیشـتر دیده می‌شود.

نتایج

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مؤلفـهٔ قـائم زلزلـه تـاثیر قابل ملاحظه ای بر نیروی محوری ستون‌ها (بین ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ درصد به عبارت دیگر بین ۱ تـا ۱۵ برابـر) دارد.

تأثیر مؤلفهٔ قائم زلزله بر نیروی محوری ستون‌ها در ساختمان‌های میان مرتبه و بلند مرتبه نسبت به ساختمان‌های کوتاه مرتبه بیشتر بوده و در ساختمان‌های کوتاه مرتبه تأثیر مؤلفهٔ قائم زلزله بیشتر در طبقات بالایی بوده، اما در ساختمان‌های میان مرتبه و بلند مرتبه این مؤلفهٔ بیشتر در طبقات تحتانی تاثیر گذار است.

هم‌چنین مؤلفهٔ قائم زلزله تأثیر قابل ملاحظه ای بر لنگر خمشی ستون‌ها (بین ۱۰۰ تا ٦۰۰ درصد به عبارت دیگر بین ۱ تا ٦ برابر) داشته وافزایش ارتفاع سازه در تأثیر بیشتر این مؤلفهٔ اثری ندارد. در ساختمان‌های کوتاه مرتبه تأثیر مؤلفهٔ قائم زلزله بر لنگر خمشی ستون‌ها بیشتر در طبقات بالایی بوده، اما در ساختمان‌های میان مرتبه و بلند مرتبه این مؤلفهٔ بیشتر در طبقات میانی تأثیر گذار است.

مؤلفهٔ قائم زلزله تأثیر کمتری بر نیروی برشی تیرها (بین ۲۰ تا ۳۰۰ درصد به عبارت دیگر بین ۰/۲ تا ۳ برابر) دارد. افزایش ارتفاع سازه تأثیر فوق العاده ناچیزی در افزایش اثر این مؤلفهٔ دارد. در ساختمان‌های کوتاه مرتبه تأثیر مؤلفهٔ قائم زلزله بر نیروی برشی تیرها بیشتر در طبقات بالایی بوده، اما در ساختمان‌های میان مرتبه و بلند مرتبه این مؤلفهٔ بیشتر در طبقات میانی اثر می‌گذارد.

افزایش لنگر خمشی دو انتهای تیرها تحت اثر مؤلفهٔ قائم زلزله بین ۲۰ تا ٤۰۰ درصد (بین ۰/۲ تا ٤ برابر) دیده شده و افزایش ارتفاع سازه در مؤثر بودن این مؤلفهٔ نامشخص است. در تمامی ساختمان‌ها (کوتاه مرتبه، میان مرتبه و بلند مرتبه)، تأثیر مؤلفهٔ قائم زلزله بر لنگر خمشی دو انتهای تیرها بیشتر در طبقات بالایی اتفاق می‌افتد.

افزایش لنگر خمشی وسط دهانه تیرها تحت اثر مؤلفهٔ قائم زلزله بین ۲۰ تا ۸۰۰ درصد (بین ۰/۲ تا ۸ برابر) دیده می‌شود و تأثیر مؤلفهٔ قائم زلزله بر لنگر خمشی وسط تیرها در ساختمان‌های میان مرتبه و بلند مرتبه نسبت به ساختمان‌های کوتاه مرتبه کمتر است. به بیان دیگر افزایش ارتفاع سازه در مؤثر بودن مؤلفهٔ قائم زلزله تاثیر معکوس دارد. در تمامی ساختمان‌ها (کوتاه مرتبه، میان مرتبه و بلند مرتبه)، تأثیر مؤلفهٔ قائم زلزله بر لنگر خمشی وسط دهانه تیرها بیشتر در طبقات بالایی اتفاق می‌افتد.

هم‌چنین مشاهده می‌شود که برش طبقات در اثر مؤلفهٔ قائم زلزله در طبقات تحتانی و میانی کاهش (بین ۱۰ تا ۵۰ درصد به عبارت دیگر بین ۰/۱ تا ۰/۵ برابر) و در طبقات فوقانی افزایش (بین ۵۰ تا ۲۰۰ درصد به عبارت دیگر بین ۰/۵ تا ۲ برابر) می یابد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرمکان افقی طبقات در تمامی مدل‌ها بین ۲۵ تا ۱۰۰ درصد (بین ۰/۲۵ تا ۱ برابر) تحت اثر مؤلفهٔ قائم زلزله کاهش می یابد. این تأثیر در ساختمان‌های میان مرتبه و بلند مرتبه بیشتر دیده می‌شود.

بحث و نتیجه گیری

همان طور که مشاهده شد، به طور کلی مؤلفهٔ قائم زلزله، تأثیر چشمگیری در افزایش نیروی محوری و لنگر خمشی ستون‌ها داشته ولی تأثیر اندکی بر افزایش نیروی برشی و لنگر خمشی تیرها دارد و این در حالی است که برش طبقات و تغییر مکان افقی طبقات تحت اثر این مؤلفهٔ کاهش می یابد.

یکی از عللی که بعضا چنین تاثیر قابل ملاحظه ای مشاهده می‌شود به این مساله بر می گردد که در این تحقیق ماکزیمم پاسخ (نظیر نیروی محور ستون‌ها و ...) در هر طبقهٔ تحت هر شتاب‌نگاشت در نظر گرفته شده است. بدین معنا که حداکثر پاسخ ها تحت اثر تنها مولفه افقی زلزله و نیز تحت اثر هم‌زمان مولفه های افقی و قائم در یک زمان اتفاق نمی‌افتد و لذا درصد افزایش پاسخها بر اثر مولفه قائم زلزله نسبت به واقعیت کمی بیشتر به نظر می رسد.

از طرفی دیگر پاسخ تمامی مدل‌ها در زمانی که سازه به مرحله غیرخطی شدن می رسد اندازه گیری شده است. از آنجا که سازه تحت اثر تنها مولفه افقی نسبت به حالتی که اثر هم‌زمان مولفه های افقی و قائم وجود دارد زودتر به مرحله غیرخطی شدن می رسد، بنابراین زمانی به وجود می‌آید که در حالتی که تنها

مولفه افقی اثر کرده و دیگر نیروی چندانی به دلیل وارد شدن به مرحله ی غیرخطی تحمل نمی کند، در همان زمان سازه در حالتی که اثر همزمان مولفه های افقی و قائم وجود دارد، به دلیل در مرحله خطی بودن، نیروی قابل توجهی را تحمل می کند و تفاوت این پاسخ ها در حالت خطی و غیرخطی باعث می‌شود که در بعضی از موارد درصد افزایش پاسخها بر اثر مولفه قائم زلزله نسبت به واقعیت کمی بیشتر به دست بیایند.

هم‌چنین ورقهای دیوارهای برشی فولادی به دلیل ایجاد تنشهای فشاری،کششی و برشی در آنها و انتقال آن به قابها (تیرها و ستون‌های اطراف) باعث می‌شوند تا اثر مولفه قائم زلزله در ستون‌ها و تیرها با توجه به برای این مولفه و نیز برای تنش های به وجود آمده تضعیف و یا تشدید شود که این مساله نیز باعث می‌شود در بعضی از موارد درصد افزایش پاسخها بر اثر مولفه قائم زلزله نسبت به کارهای تحقیقاتی گذشته و مدل‌های قابهای فولادی و بتنی کمی بیشتر به دست بیایند.

با توجه به جمیع مطالب گفته شده و سه علتی که در بالا ذکر شد (اتفاق نیفتادن همزمان پاسخها در یک لحظه- غیر خطی شدن مدل‌ها- وجود دیوارهای برشی فولادی) چنین تاثیر قابل ملاحظه ای قابل توجیه بوده و دیوار برشی نیز در این امر موثر است.

هم‌چنین با توجه به اثر قابل توجه مولفه قائم زلزله بر نیروهای سازه ای، به نظر می رسد که بایستی دنبال استفاده از روشهای جدید طراحی ساختمانها در برابر زلزله نظیر استفاده از جداسازها و میراگرهای لرزه ای مناسب در ستون‌ها و تیرها بوده تا ضمن آن‌که مقاومت سازه در برابر این مولفه افزایش داده می‌شود، از استفاده ی روش های غیر اقتصادی نظیر افزایش قابل توجه در ابعاد مقاطع تیرها و ستون‌ها و سنگین تر و سخت تر کردن سازه جلوگیری شود.

اولین قدمی که به نظر می رسد بایستی در طراحی سازه ها بر اثر مولفه قائم زلزله به آن توجه شود، محاسبه و اعمال طیف بازتاب مولفه ی قائم در تمامی آیین نامه های زلزله در دنیا است. بنابراین بایستی همانند مولفه افقی زلزله، طیف مبنای طرح برای مولفه قائم در نظر گرفته شود. بدیهی است با لحاظ کردن اثر مولفه قائم زلزله در این آیین نامه ها، سازه ها به گونه ای طراحی می‌شوند که از مقاومت بالاتری در برابر اثر این مولفه برخوردار باشند.

در پایان خاطر نشان می دارد، از آنجایی که دستیابی به ضوابط طراحی و ارائه پیشنهادات طراحی نیازمند شناخت صحیح و واقع بینانه رفتار سیستم در برابر بار موجود است، هم‌چنین استفاده از سیستمهای مقاوم نوین، نظیر دیوار برشی فولادی (که بدلیل اثرات تشکیل میدان کشش قطری رفتار مناسبی در جذب انرژی زلزله، شکل پذیری مناسب و مقاومت کافی در برابر نیروهای جانبی از خود نشان داده است) در طی فرآیند یک مطالعه پژوهشی بکر، اصیل و اصولی می تواند دریچه ای هر چند کوچک برای حل مشکل اثر این مولفه بر طراحی اینگونه سیستمها بگشاید.

امید است در پژوهشهای آتی، موارد و حالات و جنبه های مختلف از جمله اضافه کردن میراگر و بررسی اثر همزمانی آنها و یا استفاده از دیوارهای دارای سخت کننده و یا استفاده از ورقهای فولاد نرم و ... در دیگر مطالعات بکر و اصیل پژوهشی مد نظر قرار گیرد.

مراجع

۱. مومنی، علی محمد و همکاران، "اثر توام مؤلفه های افقی و قائم زلزله جهت اعمال شتاب نگاشت بر نیروی محوری ستونها و برش طبقات ساختمان های فولادی منظم با قاب خمشی"، نشریه بنا، شماره چهلم، ۹-۲۱، (۱۳۷۹).
۲. خوشنودیان، فرامرز؛ حسینی کرد خیلی، سید احمد، "اثرات سه مولفه لرزه ای بر روی رفتار دینامیکی ساختمانهای نامتقارن فولادی"، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، (۱۳۸۳).

3. Iyengar,R and Shinozuka ,M., “Effect of self-weight and vertical acceleration on the behavior of tall structures during earthquake” ,J.Earthquake Engineering and Structural Dynamics ,Vol. 1, No. 1, pp. 69-78, (1972).

4. Sadeghvaziri, M.A. and Foutch, D.A., “Dynamic behavior of RC highway bridges under combined effect of vertical and horizontal motions”, J.Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 20, No. 6, pp. 535-549, (1991).

5. Reyes-Salazar, A and Haldar, A., ”Structural response considering the vertical component of earthquakes”, J.Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 74, No. 2, pp. 131-145, (2000).

6. Diotallevi, P.P. and Landi, L., ”Effect of the axial force and of the vertical ground motion component on the seismic response of R/C frames”, Proc. of 12th World Conf. on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, Paper No. 1026 (2000).

7. Alaghebandian, R., et al., “Effect of Distributed Mass on Earthquake Response of Reinforced Concrete Frames”, Proc. Of 12th World Conf. on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, Paper No.2230, (2000).

8. Ju, S. H. Et al., “3D Analyses of Buildings under Vertical Component of Earthquake”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 126, No. 10, pp. 1196 – 1202, (2000).

9. Hosseini, M. and Firoozi Nezamabadi, M., “A Study on the Effect of Vertical Ground Acceleration on the Seismic Response of Steel Buildings” 13th world conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, (2004).

۱۰. قلهکی، مجید؛ رضائی فر، امید؛" ارزیابی روش های تعیین ظرفیت برشی دیوارهای برشی فولادی"، اولین کنفرانس بین المللی مقاوم سازی لرزه ای، تبریز، ایران، (۱۳۸۷).

11. Thorburn, L.J. , Kulak, G.L. and Montgomery, C.J., “Analysis of Steel Plate Shear Walls”, Structural Engineering Report No. 107, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, (1983).

12. Timler, P.A. and Kulak, G.L., “Experimental Study of Steel Plate Shear Walls”, Structural Engineering Report No. 114, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, (1983).

13. Elgaaly, M., Caccese, V. and Du, C., “Postbuckling Behavior of Steel Plate Shear Walls under Cyclic Loads”, Journal of Structural Engineering ASCE, Vol. 119, No. 2, pp. 588-605, (1993).

14. Sabouri-Ghomi, S. and Roberts, T. M., “Nonlinear Dynamic Analysis of Thin Steel Plate Shear Walls”, Computers and Structures, Vol. 39, No. 1-2, pp. 121–127, (1991).

15. Roberts, T. M. and Sabouri-Ghomi, S., “Hysteretic Characteristics of Unstiffened Plate Shear Panels”, Thin Walled Structures, Vol. 12, No.2, pp. 145–162, (1991).

16. Vian, D. and Bruneau, M., “Testing of Special LYS Steel Plate Shear Walls”, Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 978, Vancouver, British Columbia, Canada, (2004).

۱۷. قلهکی، مجید؛ "بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک و اثر تیر به ستون در آنها"، رساله ی دکتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر، (۱۳۸۶).

۱۸. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن؛ " آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)"، ویرایش ۳، (۱۳۸٤).